

2. Baldwin C.V., Moo-Young M. Disruption of a filamentous fungal organism (*N. sitophila*) using a bead mill of novel design // *Biotechnology Techniques*. – 1991. – Volume 5. – №5. – P. 331-336.
3. Belo I., Santos J. A. L., Cabral J. M. S., Mota M. Optimization Study of *Escherichia coli* TB1 Cell Disruption for Cytochrome *b*<sub>5</sub> Recovery in a Small Scale Bead Mill // *Biotechnol. Prog.* – 1996. – 12, – P.201-204.
4. Bunge F., Pietzsch M., Müller R., Syldatk C. Mechanical disruption of *Arthrobacter* sp. DSM 3747 in stirred ball mills for the release of hydantoin-cleaving enzymes // *Chemical Engineering Science*. – 1992. - Volume 47. - Issue 1. – P. 225-232.
5. NETZSCH - мировой лидер-производитель машино- и приборостроения: анализ и тестирование, измельчения и диспергирования, насосы и другие системы. Режим доступа: <https://www.netzsch-grinding.com>
6. Postma P.R., Suarez-Garcia E., Safi C., Yonathan K., Olivieri G., Barbosa M.J., Wijffels R.H., Eppink M.H.M. Energy efficient bead milling of microalgae: Effect of bead size on disintegration and release of proteins and carbohydrates // *Bioresource Technology*. – 2017. – Volume 224. – P. 670-679.
7. Schütte H., Kroner K.H., Hustedt H., Kula M.-R. Experiences with a 20 litre industrial bead mill for the disruption of microorganisms // *Enzyme and Microbial Technology*. – 1983. – Volume 5. - Issue 2. – P. 143-148.
8. Доровський О.В. Світовий фармацевтичний ринок: структура, тенденції розвитку, точки зростання // *Науковий вісник Херсонського державного університету*. – Випуск 9-1. – Частина 3. – 2014. – с. 34-38.
9. Новіков В.П., Сидоров Ю.І., Швед О.В. Тенденції розвитку комерційної біотехнології // *Вісник НАН України*. - №2. – 2008. – с. 25-39.

УДК 621.793

### ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ СЕРОГО ЧУГУНА СИЛИЦИДАМИ

*И. М. Косякова, канд. техн. наук М. А. Кардаполова, ОНИЛ «Плазменные и лазерные технологии», доктор техн. наук. О. Г. Девойно, ОНИЛ «Плазменные и лазерные технологии», БНТУ, г. Минск*

*Приведены результаты исследования микроструктуры, микротвердости и износа серого чугуна СЧ20 после лазерного легирования SiC и B+Si. Обработку осуществляли с использованием непрерывного CO<sub>2</sub>-лазера мощностью 1 кВт при скорости движения лазерного луча 400–1100 мм/мин. В результате лазерного легирования B+Si микротвердость увеличилась до 9,3 – 14,2 ГПа, а после легирования SiC микротвердость увеличилась до 7,9 – 12,8 ГПа. Микротвердость поверхностного слоя в обоих случаях линейно коррелирует (коэффициент корреляции составляет 0,93 для SiC и 0,84 для B+Si) со скоростью обработки. Лазерная закалка позволила уменьшить скорость изнашивания приблизительно в 2 раза (до 0,15 мм<sup>3</sup>/км), а лазерное легирование уменьшает скорость изнашивания приблизительно в 10-15 раз (до 0,014-0,024 мм<sup>3</sup>/км). Работа выполнена при поддержке БРФФИ, договор T19M-105.*

*Ключевые слова: лазерное легирование, лазерная закалка, карбид кремния, микроструктура, микротвердость, износ.*

**Введение.** Серые чугуны нашли широкое применение в машиностроении для изготовления корпусных деталей. Выбор марки чугуна зависит от типа детали, ее функционального назначения, а также характера и типа износа испытываемых сопрягаемыми поверхностями деталей. В ряде случаев из-за тяжелых локальных нагрузок и значительного износа (абразивный, адгезионный, усталостный и др.) возникает необходимость в поверхностном упрочнении проблемных зон. С позиции экономичности, эффективности и качества в настоящее время наиболее предпочтительным является использование высококонцентрированных источников нагрева – например, источников лазерного излучения [1-2].

Лазерные технологии поверхностного упрочнения материалов находят все большее и разнообразное применение [2-4]. Лазерная закалка применяется для упрочнения деталей из серого чугуна [5], которая позволяет увеличить микротвердость поверхности чугунных деталей. Для придания поверхности чугунных деталей дополнительных свойств применяется лазерное легирование. В данной работе рассмотрены особенности лазерного легирования серого чугуна СЧ20 силицидами - SiC и B+Si.

#### **Методика проведения исследований.**

Шликерная обмазка наносилась на подготовленную дробеструйной обработкой поверхность образцов из чугуна СЧ20 прямоугольной формы сечением 60x20x7 мм. Обмазка состояла из модифицирующей добавки SiC (первый вариант) и B+Si (второй вариант) с небольшим количеством связующего (2- %-ный раствор клея «AGO» в ацетоне). Процесс оплавления осуществляли непрерывным лазером Комета-2 мощностью N = 1 кВт при диаметре пятна лазерного луча  $d=1,0 \cdot 10^{-3}$  м.

Микротвердость измерялась микротвердомером ПМТ-3 при нагрузке 100 г и времени экспозиции 10 с. Микроструктура зон лазерного термоупрочнения анализировалась оптической микроскопией с помощью микроскопа MICRO-200 при увеличении от 100 до 1000 раз. Для выявления микроструктуры использовали 4 %-й водный раствор азотной кислоты.

Исходная структура необработанного образца из чугуна СЧ20 имеет феррито-перлитную структуру, форма графита – пластинчатая, расположение графита – розеточное (рис. 1).

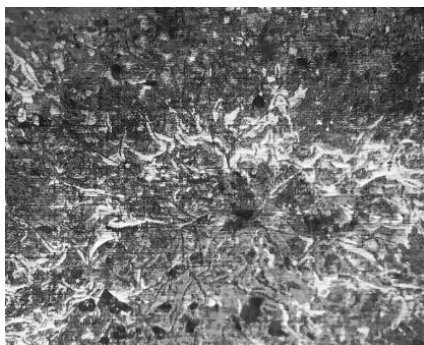


Рисунок 1 - Структура серого чугуна СЧ20 в исходном состоянии, х500

### Результаты и обсуждение

Для легирования поверхностного слоя использовались две разновидности твердых частиц: В+Si с размерами от 2 до 20 мкм и карбид кремния SiC с размерами от 2 до 10 мкм.

Для оценки влияния лазерной обработки на изменения свойств поверхностного слоя рассматривалось совместное влияние диаметра лазерного пучка и скорости оплавления, причем использовался дробный факторный план типа 22. Матрица планирования приведена в табл. 1.

Таблица 1 - Кодовые значения и величины переменных, используемые в исследованиях

Номер эксперимента	X <sub>1</sub>		X <sub>2</sub>	
	Код	Значение, мм	Код	Значение, мм/мин
1	-1	1	-1	100
2	+1	2	-1	100
3	-	1	+1	600
4	+1	2	+1	600

Зона лазерного термоупрочнения при легировании SiC и при скорости перемещения лазерного луча 700 мм/мин представлена на рисунке 3.

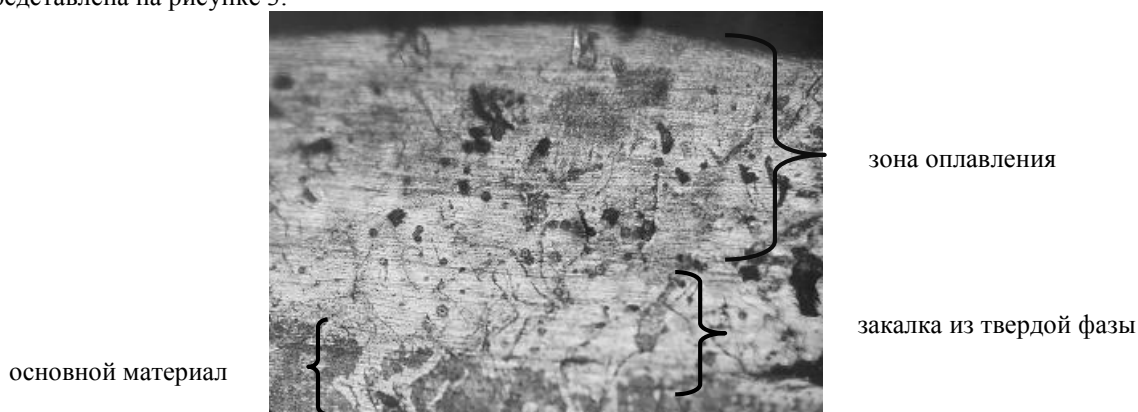


Рисунок 3 - Структура чугуна после лазерного легирования, х200

При лазерном легировании зона лазерного воздействия состоит из зоны оплавления (закалки из жидкой фазы) и закалки из твердой фазы. Зона термического влияния состоит лишь из закалки из твердой фазы. В зоне оплавления при легировании В+Si и SiC отсутствуют графитные включения, а структура представляет собой мелкодисперсные дендриты, состоящие из ветвей первого и второго порядка.

В зоне оплавления наблюдаются нерастворенные включения. Можно предположить, что это карбиды кремния, которые при высоких скоростях не успели раствориться.

На рисунках 4-5 представлено влияние скорости перемещения луча лазера на микротвердость и глубину зоны лазерного влияния.

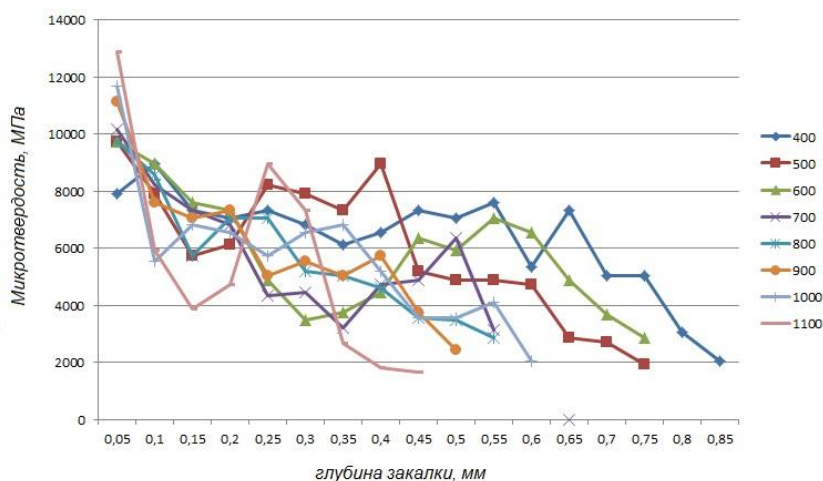


Рисунок 5 - Зависимость микротвердости серого чугуна СЧ20 от скорости пятна нагрева в диапазоне скоростей от 400 мм/мин до 1100 мм/мин, легирующий компонент SiC

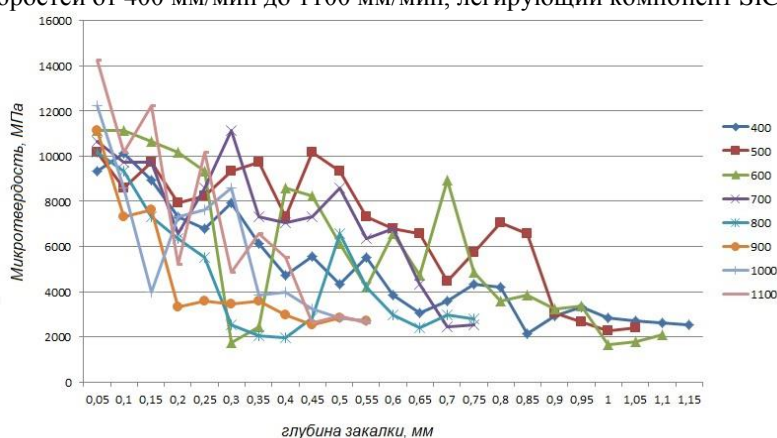


Рисунок 6 - Зависимость микротвердости серого чугуна СЧ20 от скорости пятна нагрева в диапазоне скоростей от 400 мм/мин до 1100 мм/мин, легирующий компонент В+Si

Микротвердость поверхностного слоя чугуна СЧ20 составляет 2,0 – 2,8 ГПа до и 9,3 – 14,2 ГПа после легирования В+Si и 7,9 – 12,8 ГПа после легирования SiC. Микротвердость поверхностного слоя в обоих случаях линейно коррелирует (коэффициент корреляции составляет 0,93) со скоростью обработки (рис. 7). Причем, корреляция положительная. С увеличением скорости обработки микротвердость увеличивается.

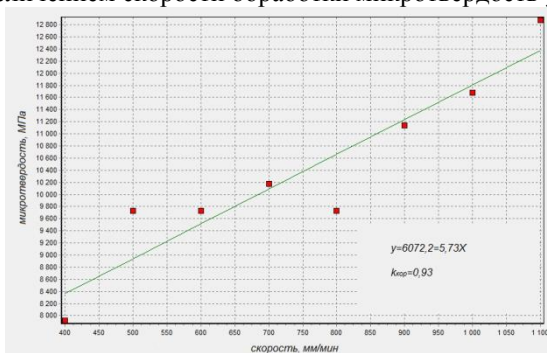


Рисунок 7 – Влияние скорости движения луча лазера на микротвердость серого чугуна СЧ20 при N=1 кВт и d=4 мм, легирующий компонент SiC

На рисунке 8 представлена гистограмма скорости изнашивания серого чугуна СЧ20, серого чугуна после лазерной закалки ЛЗ и после лазерного легирования ЛЛ.

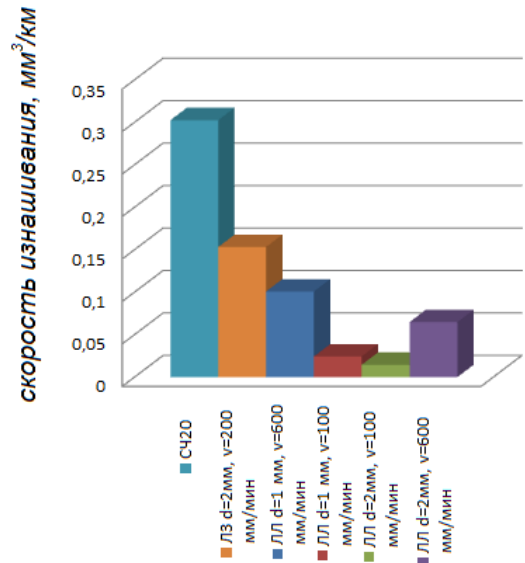


Рисунок 8 – Гистограмма скорости изнашивания серого чугуна SCh20 в состоянии поставки, серого чугуна после лазерной закалки ЛЗ и после лазерного легирования ЛЛ SiC

Как видно из рисунка 8, максимальная скорость изнашивания наблюдается у необработанного чугуна (0,3 мм³/км), лазерная закалка позволяет уменьшить скорость изнашивания приблизительно в 2 раза (до 0,15 мм³/км), а лазерное легирование уменьшает скорость изнашивания приблизительно в 10-15 раз (до 0,014-0,024 мм³/км).

Графическая зависимость износа от давления в месте контакта для покрытий, содержащих SiC и B+Si, представлены на рисунках 9 - 10.

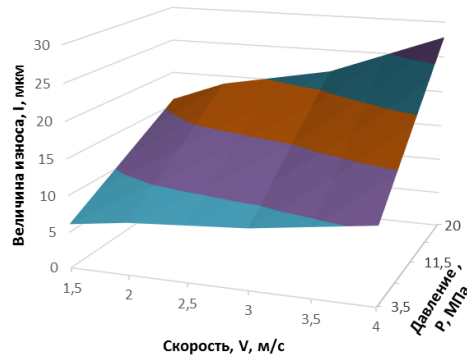


Рисунок 9 – Поверхность отклика влияния давления и скорости на величину износа покрытия SiC

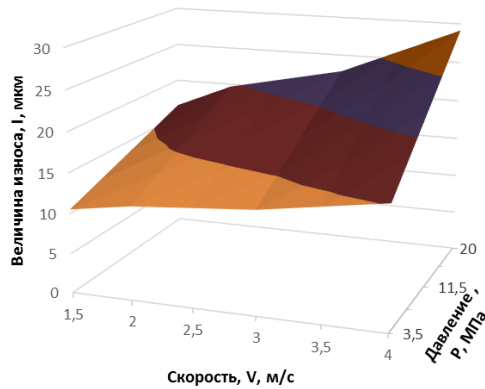


Рисунок 10 – Поверхность отклика влияния давления и скорости на величину износа покрытия B+Si

С увеличением контактного давления и скорости скольжения величина износа образцов с обмазками возрастает: с 10,5 мкм до 29,1 мкм для B+Si и с 6,0 мкм до 27,8 мкм для SiC. Таким образом, покрытия с обмазкой

из В+Si и SiC можно рекомендовать для эксплуатации при средних скоростях в пределах 2–3 м/с и давлениях в пределах от 5 МПа до 15 МПа.

**Заключение.** Микротвердость поверхностного слоя чугуна СЧ20 составляет 2,0 – 2,8 ГПа до обработки. После лазерного легирования В+Si микротвердость увеличилась до 9,3 – 14,2 ГПа, а после легирования SiC микротвердость увеличилась до 7,9 – 12,8 ГПа. Микротвердость поверхностного слоя в обоих случаях линейно коррелирует (коэффициент корреляции составляет 0,93 для SiC и 0,84 для В+Si) со скоростью обработки. Лазерная закалка позволяет уменьшить скорость изнашивания приблизительно в 2 раза (до 0,15 мм<sup>3</sup>/км), а лазерное легирование уменьшает скорость изнашивания приблизительно в 10-15 раз (до 0,014-0,024 мм<sup>3</sup>/км).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьянц, А. Г. Основы лазерной обработки материалов / А. Г. Григорьянц. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
2. Девойно, О.Г. Поверхностное упрочнение серого чугуна совмещенной лазерной и ультразвуковой обработкой / О.Г. Девойно, С.Ф. Кукин, Н.В. Спиридонов, О.С. Кобяков, Е.Л. Бузун // Наука и техника. – 2013. – № 2. – С. 3–6.
2. Гилев, В. Г. Лазерное инжекционное легирование аустенитного чугуна ЧН16Д7ГХ титаном / В. Г. Гилев, Е. А. Морозов // Изв. вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2015. – № 3. – С. 44–52.
3. Gilev, V. Laser Quenching Of Axial Bearings In Submersible Multistage Pumps Made Of Steel-Brass Pseudo-Alloy / V. Gilev, E. Morozov, A. Khanov, T. Abyaz // International Journ. of Applied Engineering Research. – 2015. – Vol. 10, № 20. – P 40861–40868.
4. Mordike, B.L. Improvement of wear properties by laser surface treatment / B. L. Mordike // Proc. 3d Eurohean Cjnf. «Laser Treatment of Materials. ECLAT'90» 2 Vol. Eds. H.W. Bergmann, R.Kupfer. – Vol. 1. – P. 371-376.
5. Чеканова, Н. Т. Исследование влияния мощного СО<sub>2</sub> - лазера и свойства чугунов, применяемых в автомобилестроении: Дисс. канд. тех. наук. - Завод ВТУЗ при Моск. автом. з-де им. И.А. Лихачева, 1981. - 187 с.

УДК 621.891:621.793

#### **ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ TiB<sub>2</sub> НА СВОЙСТВА ПОКРЫТИЯ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ ТИПА AISI 316LSi**

*С. М. Криуша, канд. техн. наук, доцент О. В. Дьяченко, БНТУ, г. Минск; канд. физ.-мат. наук., В. С. Голубев, канд. техн. наук, зав. отделом И. И. Везера, ФТИ НАН Беларуси, г. Минск*

*Резюме - в статье приведены результаты исследования влияния лазерного легирования газотермического покрытия типа AISI 316LSi основа Ст. 45. Была изучена возможность легирования покрытия в атмосфере защитного газа - аргоне и азоте. В качестве легирующей обмазки в виде порошка был использован борид TiB<sub>2</sub>.*

*Ключевые слова: газотермическое напыление, лазерное модифицирование, микротвердость, микроструктура, диборид титана.*

**Введение.** Целесообразно с целью удешевления получаемых материалоемких деталей использовать металлы с разными свойствами сердцевины и поверхностного слоя. Тепловым источником в этом случае может послужить лазерное излучение, что дает возможность разработать технологию формирования поверхностного слоя, связать параметры технологической и термической обработок с изменением структуры сформированного поверхностного слоя. [1,2].

Использование в качестве покрытия нержавеющей стали объясняется её исключительными эксплуатационными характеристиками. Нержавеющая сталь получила широкое распространение во множестве областей производственной деятельности современного общества. Среди наиболее заметных преимуществ использования покрытий из нержавеющей стали стоит выделить долговечность, устойчивость к коррозии и атмосферным воздействиям, к кислотным и щелочным средам. Нержавеющая сварочная проволока активно используется в: производстве машин и оборудования; энергетической промышленности; нефтехимической промышленности;

Порошковая проволока для полуавтоматической сварки нержавеющей и жаростойких сталей типа AISI 316LSi обладает высокой стойкостью к коррозии в кислото- и хлоросодержащей среде. Применяется в химической промышленности, судостроительной, нефтехимической.

Целью работы является изучение влияния параметров лазерной обработки, газовой среды при дополнительном легировании диборидом титана TiB<sub>2</sub> газотермического покрытия типа AISI 316LSi на изменение величины его микротвердости.

**Основная часть.** Обработке излучением СО<sub>2</sub> непрерывного лазера «Комета-2» мощностью 500- 800 В в среде аргона и азота подвергали образцы стали 45 с предварительно нанесенным гиперзвуковой металлизацией нержавеющей стали AISI 316LSi. На часть образцов наносили легирующую обмазку TiB<sub>2</sub> со связующим на жидком стекле, оставшиеся, оплавливали без легирования. Толщина слоя обмазки составляла ~ 0,1 мм. Диаметр пятна лазерного луча варьировался от 1 до 2 мм, скоростями перемещения от 2 до 30 мм/с.